

STUDIE VLIVU MODELOVÁNÍ PODZÁKLADÍ NA PROVOZNÍ DYNAMIKU
KOMPRESORU

STUDY OF SUBSOIL MODELING INFLUENCE ON COMPRESSOR
OPERATIONAL DYNAMICS

Abstract

This work deals with the interaction of a structure and its subsoil. The investigated object is a concrete foundation of the compressor. The calculation model of the compressor, foundation block and subsoil is assembled by the finite element method. The paper concerns with dynamic response to harmonic and general excitation acting in time. Obtained results are treated in the numerical and graphical form.

Key words: Dynamics of Constructions, Concrete Foundation of Machines, Interaction of Construction with Subsoil.

Úvod

Základy strojů a strojních zařízení jsou stavební konstrukce, zatížené dynamickými účinky vznikajícími provozem stroje. Působící zatížení je konstrukcí základu přenášeno do podzákladí. Vzniká tak složitá soustava vzájemně se ovlivňujících prvků, kterými jsou stroj, základ, a podzákladí. Základy strojů a strojních zařízení jsou stavební konstrukce, zatížené

Oblast podzákladí, která je dnes již přirozenou součástí výpočtového modelu stavební konstrukce, představuje v realitě, při uvážení rozměrů konstrukce, neohrazený poloprostor. Při tvorbě modelu podzákladí v programech pracujících na bázi metody konečných prvků se tak setkáme s problémem, jakým způsobem korektně zohlednit neohraničitelnost reálné oblasti ve výpočtovém, konečnoprvkovém prostorovém modelu.

V úlohách statiky bývá modelováno podzákladí pouze v blízkosti řešené konstrukce a jeho rozměry nemají vliv na výsledky analýzy.

Rozeznání modelu oblasti podzákladí však získává na významu v úlohách dynamiky konstrukcí. Vlnění šířící se podzákladím směrem od konstrukce dosáhne ve výpočtovém modelu až hranice modelu podzákladí, která v reálném prostředí neexistuje. Záleží na přístupu řešitele, jakým způsobem hranici modelu vytvořil a do jaké míry tak ovlivní hodnoty výpočtem určených veličin dynamické odezvy.

Jednou z možností je na hranici modelu použít tzv. nekonečné prvky. Pro řešení interakce konstrukce s podzákladím jsou dnes odvozeny prostorové nekonečné prvky, umožňující řešit dynamické úlohy šíření vlnění nekonečným pružným prostředím. Pomocí nekonečných prvků lze vytvořit model podzákladí jako neohrazený

¹ Ing., VUT BRNO, FAST, Stavební mechanika, Veveří 331/95, 602 00 Brno, bratka.m@fce.vutbr.cz

² Ing., PhD., VUT BRNO, FAST, Stavební mechanika, Veveří 331/95, 602 00 Brno, kala.j@fce.vutbr.cz

³ Doc., Ing., CSc., VUT BRNO, FAST, Stavební mechanika, Veveří 331/95, 602 00 Brno, salajka.v@fce.vutbr.cz

poloprostor při použití co nejmenšího konečného počtu prvků. Touto problematikou se zabývá řada autorů, viz např. [1], [2]. V komerčních programových systémech, např. v systému ANSYS, jsou již dnes zabudovány nejjednodušší nekonečné prvky, není je však možné použít pro úlohy interakce konstrukce s podložím.

Druhým možným přístupem je vytvořit model podzákladí jako oblast konečných rozměrů s předem známými hranicemi, na kterých se zadají okrajové podmínky – vazby. Jednotlivé typy okrajových vazeb pak různě ovlivňují vlastnosti výpočtového modelu a výsledky prováděných výpočtů a analýz.

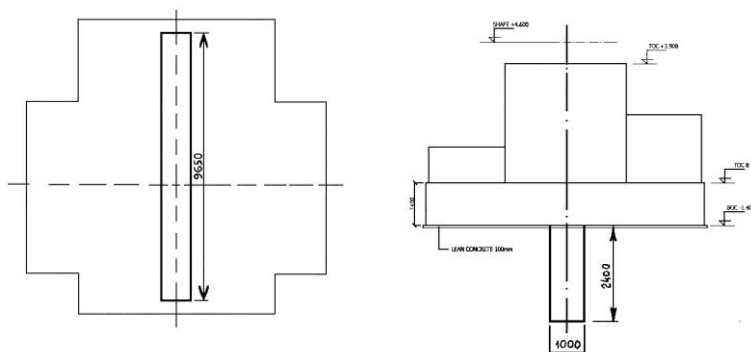
Předložený článek předkládá výsledky harmonické a transienční analýzy konstrukce blokového základu kompresoru. Práce se snaží poukázat na vliv modelování podzákladí na hodnoty odezвовých veličin. Měnicím se parametrem použitých výpočtových modelů je typ vazby na hranici modelu oblasti podzákladí. Analýza konstrukce byla provedena v programovém systému ANSYS.

Popis konstrukce

Soustrojí tvoří dvouválcový ležatý kompresor s protiběžnými písty a pohonným elektromotorem. Funkčními jednotkami soustrojí jsou kompresor, elektromotor, levý a pravý tlumič a olejový agregát, o celkové hmotnosti 51,5 Mg. Funkční jednotky mají samostatné základové desky, kotvené šrouby do základové konstrukce. Silové účinky na základovou konstrukci jsou odvozeny z nevyváženosti rotujících a translačních hmot mechanismu kompresoru.

Analyzovanou konstrukcí je silně vyztužený základový železobetonový (ŽB) blok, s množstvím výztuže min. 200 kg.m⁻³. Rozměry základu jsou 10 650 mm x 11 000 mm x 1 400 mm (D x Š x V). Horní povrch ŽB základu je složitě profilován, vystupují z něj dílčí ŽB bloky, které nesou jednotlivé součásti podporovaného soustrojí. Dolní povrch je z důvodu zajištění stability konstrukce opatřen železobetonovým žebrem (schéma viz obr. 1). Blok je uložen na vrstvě podkladního betonu tl. 100 mm, po stranách je od okolní zeminy oddělen vrstvou polystyrenu tl. 50 mm.

Podzákladí je zjednodušeně uvažováno jako homogenní oblast, jejíž mechanické vlastnosti byly dypočteny z rychlostí šíření tlakových a smykových vln v zemině, určených na základě zkoušek.



Obr. 1 Schéma základu

Výpočtový model

Za účelem zkoumání dynamické odezvy konstrukce byl vytvořen v programovém systému ANSYS prostorový výpočtový model konstrukce včetně podzákladí. Byly modelovány všechny části konstrukce – stroj, základ a oblast podzákladí.

Výpočtový model soustrojí byl vytvořen zjednodušeně. Prutové prvky BEAM44 nahrazují svou tuhostí tuhost konstrukce soustrojí. Hmotnost celého soustrojí je soustředěna do pěti diskretních uzlů tvořených prvky MASS21, ležících v teoretických místech těžišť jednotlivých částí soustrojí. Ukotvení stroje do ŽB základu je modelováno pomocí kotevních desek, vytvořených ze skořepinových prvků SHELL43. Vzájemná provázanost pohybu soustředěných hmot při silovém buzení jediné hmoty je zajištěna pomocí prutových prvků LINK8. Protože veškerá hmotnost kompresoru je soustředěna v hmotných uzlech, jsou tuhé pruty a kotevní desky definovány jako izotropní materiál s nulovou hmotností. Výpočtový model základového bloku, podkladního betonu a postranní dilatační vrstvy polystyrenu byl sestaven z prostorových prvků SOLID45. Oblast podzákladí byla modelována opět prostorovými prvky SOLID45. Celkem bylo v modelu použito 72 266 prvků, lokalizovaných 77 601 uzlem.

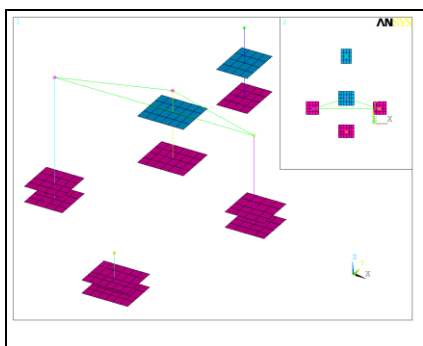
Ve všech dílčích částech modelu byl použit materiálový model lineárního izotropního materiálu. Hodnoty materiálových konstant jsou dány v tabulce tab. 1.

Tab. 1 Materiálové modely

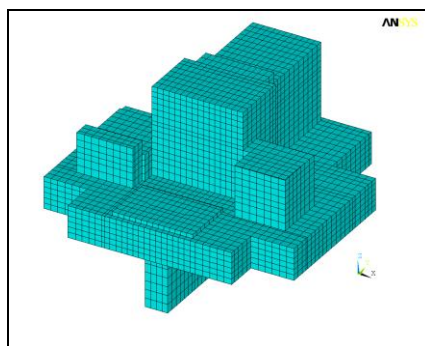
	Soustrojí	Beton základu	Podkladní beton	Polystyren	Podzákladí
E [Pa]	$210 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$8,0 \cdot 10^5$	$149 \cdot 10^6 + 5,96 \cdot 10^6 h^{(1)}$
ν [-]	0,30	0,20	0,20	0,49	0,49
ρ [kg.m ⁻³]	0	2400	2300	10	2090

¹⁾ Modul pružnosti zeminy podzákladí je lineární funkcí hloubky h [m] od povrchu zeminy. Jednotlivé horizontální vrstvy konečných prvků měly různý modul pružnosti dle vertikální polohy vrstvy.

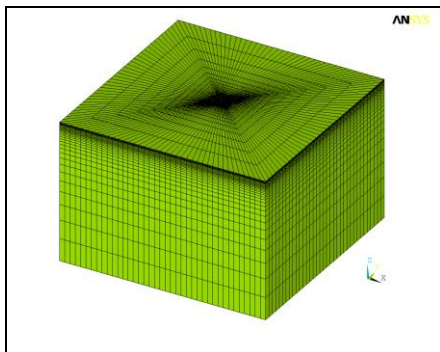
Konstrukce modelované včetně oblasti podzákladí vyžadují zadání matematického modelu útlumu, který umožňuje přímou integraci pohybových rovnic. V modelu byl použit model Rayleighova útlumu, který uvažuje hodnotu matice tlumení $[C]$ jako lineární kombinaci matice hmotnosti $[M]$ a matice tuhosti $[K]$ podle vztahu $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$, kde α , β jsou koeficienty Rayleighova útlumu. Byl uvažován poměrný útlum o velikosti $\alpha = 2 \%$, této hodnotě odpovídají hodnoty koeficientů $\alpha = 0,75$ a $\beta = 0,00036$.



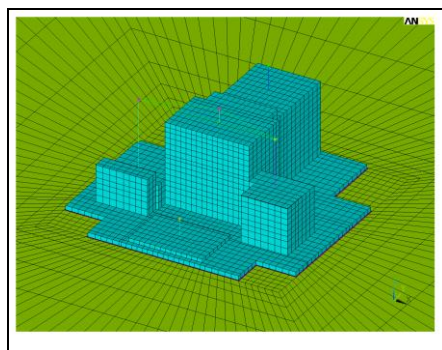
Obr. 2 Model kompresoru



Obr. 3 Model betonového základu



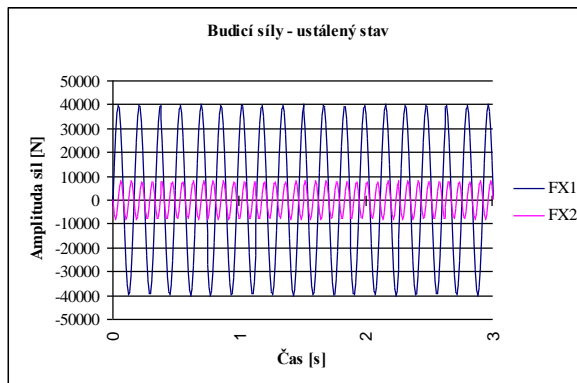
Obr. 4 Model oblasti podzákladí



Obr. 5 Model základu a stroje včetně podzákladí

Dynamické buzení konstrukce

Dynamické buzení stroji vzniká pohybem nevyvážených hmot. V modelované úloze je dynamické zatížení vyvoláno provozem kompresoru. Skutečné působení stroje na základovou konstrukci bylo pro účely výpočtu nahrazeno modelem dynamického buzení, který je tvořen osmi působícími silami. Tyto síly byly určeny konstantními hodnotami, působišťem, směrem a funkcemi, popisujícími proměnnost hodnoty síly buzení v čase. Byl modelován ustálený stav buzení. Graf 1 ukazuje průběh velikosti dvou budících sil v čase.

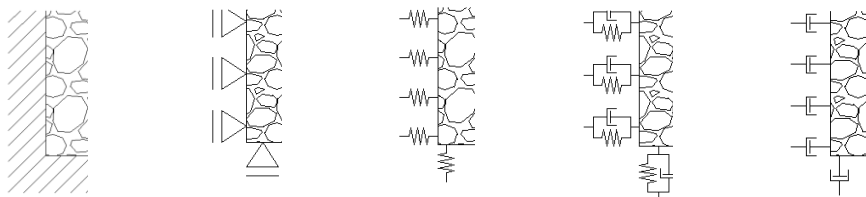


Graf 1 Budící síly

Řešené varianty výpočtového modelu

Okrajové podmínky na hranici modelu podzákladí byly modelovány pěti různými variantami vazeb:

- a) vetknutí b) kluzná c) pružná d) vazkopružná e) disipativní



ad a) vetknutí – uzlům na hranici modelu podzákladí jsou odebrány posuvy všemi směry,

ad b) kluzná vazba – hraničním uzlům jsou odebrány posuvy ve směru kolmém k ploše, na níž se uzel nachází,

ad c) pružná vazba – uzly jsou pomocí prvků COMBIN14 podepřeny tuhými pružinami,

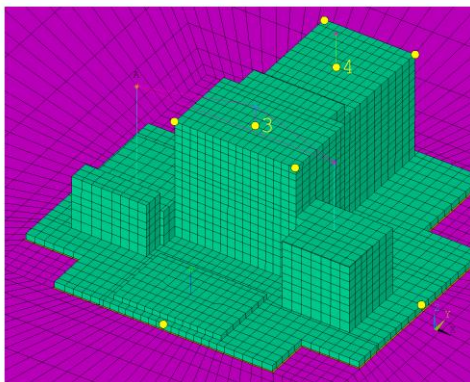
ad d) vazkopružná vazba – prvek COMBIN14 jako soustava pružina – tlumič, bez potlačení tuhosti pružiny,

ad e) disipativní vazba – COMBIN14 zadán jako soustava pružina – tlumič s velmi malou tuhostí pružiny.

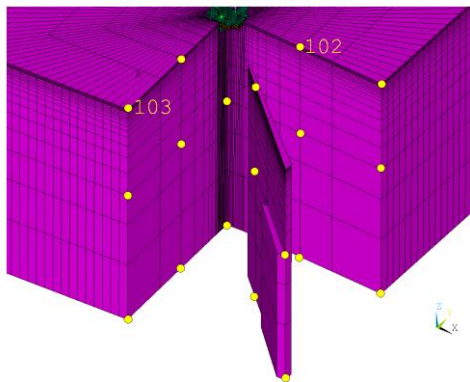
Sledované uzly modelu

Na konstrukci byla sledována odezva celkem ve vybraných 32 uzlech, 12 uzlů je umístěno na konstrukci základu a stroje, zbylých 20 uzlů v modelu podzákladí. Závěry práce jsou doloženy zobrazením odezvových veličin na konstrukci v uzlech č.3 a č.4 a

v podzákladí jsou prezentovány v uzlech č.102 a č.103. Sledované uzly jsou popsány na obr. 6,7.



Obr. 6 Sledované uzly na konstrukci

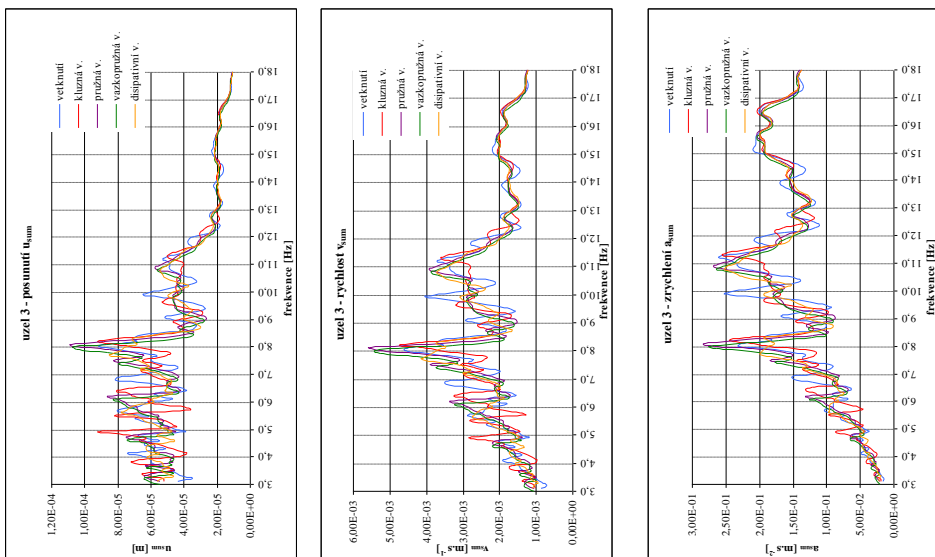


Obr. 7 Sledované uzly v podzákladí

Odezva na harmonické buzení

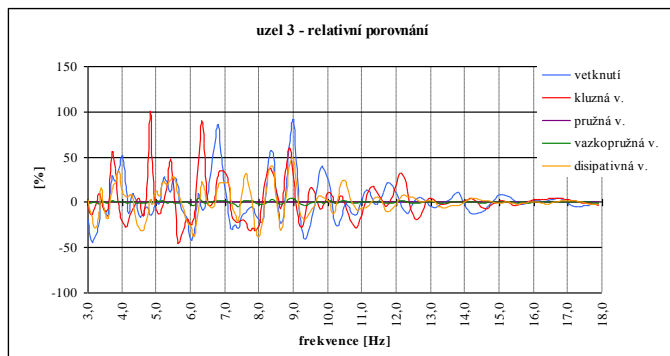
Harmonická analýza řeší ustálenou odezvu konstrukce zatížené harmonickým zatížením, tj. zatížením, které se v čase mění podle předpisu funkce sinus. Všechna zatížení působící na konstrukci mají pouze jednu budící frekvenci. Tato analýza se používá pro řešení dynamické odezvy konstrukcí ve frekvenční oblasti.

Výsledky provedené analýzy po vzájemném porovnání ukazují, že vliv typu okrajové podmínky na dynamickou odezvu konstrukce, vyvolanou harmonickým zatížením, je značný. Dokládají to následující grafy zobrazující odezvu ve sledovaném uzlu č.3.



Graf 2 Odezva na harmonické buzení

Charakter odezvy všech variant okrajových podmínek je přibližně stejný. Z relativního porovnání hodnot přemístění u_{sum} (graf 3) je však patrné, že rozdíly v odezvě, vyhodnocované pro konkrétní hodnotu frekvence, mohou být i při stejném buzení v řádu stovek procent. Relativní srovnání je vyjádřeno vzhledem k hodnotám odezvy při pružném uložení konstrukce.



Graf 3 Relativní porovnání

Maximální hodnoty přemístění u_{sum} a jejich vzájemné porovnání ukazuje tabulka 2:

Tab. 2 Relativní porovnání u_{sum}

	Uzel 3			Uzel 4		
	f [Hz]	$\max u_{sum}$ [m]	[%]	f [Hz]	$\max u_{sum}$ [m]	[%]
Kluzná v.	4,9	9,24E-05	85	8,2	7,65E-05	86
Vetknutí	8,0	9,18E-05	84	8,1	7,65E-05	86
Pružná v.	8,1	1,09E-04	100	8,1	1,00E-04	100
Vazkopružná v.	8,1	1,07E-04	98	8,1	9,77E-05	98
Disipativní v.	7,7	8,51E-05	78	7,7	7,11E-05	71

Odezva na buzení v čase

Časová (transientní) analýza je určena k řešení dynamické odezvy konstrukce na libovolné zatížení, popsané funkcí změny hodnoty zatížení v závislosti na čase. Jednotlivá zatížení mohou mít různou budící frekvenci. Řešení je tedy provedeno v časové oblasti. Časová analýza je v programovém systému ANSYS řešena implicitní Newmarkovou metodou časové integrace, známé také pod názvem metoda průměrného zrychlení.

Délka řešeného časového úseku byla zvolena 10 s, aby bylo zajištěno utlumení vlastního kmitání konstrukce vzniklého na začátku výpočtu analýzy v důsledku numerické konstrukce výpočtu. Z důvodu velikosti výpočtového modelu byly výsledky analýzy uloženy pouze ve sledovaných uzlech modelu. Ukládanými veličinami byly hodnoty uzlových přemístění.

Požadavky na mezní úroveň vibrací stroje za provozu byly:

$d_m = 77,5 \text{ } \mu\text{m}$ - amplituda výchylky kmitání základ. desky kompresoru,

$v_m = 4,26 \text{ mm.s}^{-1}$ - amplituda rychlosti kmitání základ. desky kompresoru,

$d_m = 65,7 \text{ } \mu\text{m}$ - amplituda výchylky kmitání základ. desky motoru,

$v_m = 2,55 \text{ mm.s}^{-1}$ - amplituda rychlosti kmitání základ. desky motoru.

Základová deska kompresoru ve výpočtových modelech odpovídá sledovanému uzlu č.3, základová deska motoru sledovanému uzlu č.4.

V tabulce 3 jsou hodnoty odezvy pro sledovaný uzel č.3 – základ. desky kompresoru.

Tab. 3 Maxima odezvy – uzel č.3

Uzel 3	Typ okrajové vazby				
	Vetknutí	Kluzná	Pružná	Vazkopružná	Disipativní
u_{sum} [m]	$4,47 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	$7,42 \cdot 10^{-5}$	$7,13 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-5}$
v_{sum} [m.s ⁻¹]	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$

Porovnáním s mezními hodnotami vyplývá, že ustálený stav kmitání základové desky kompresoru vyhoví v každé z řešených variant.

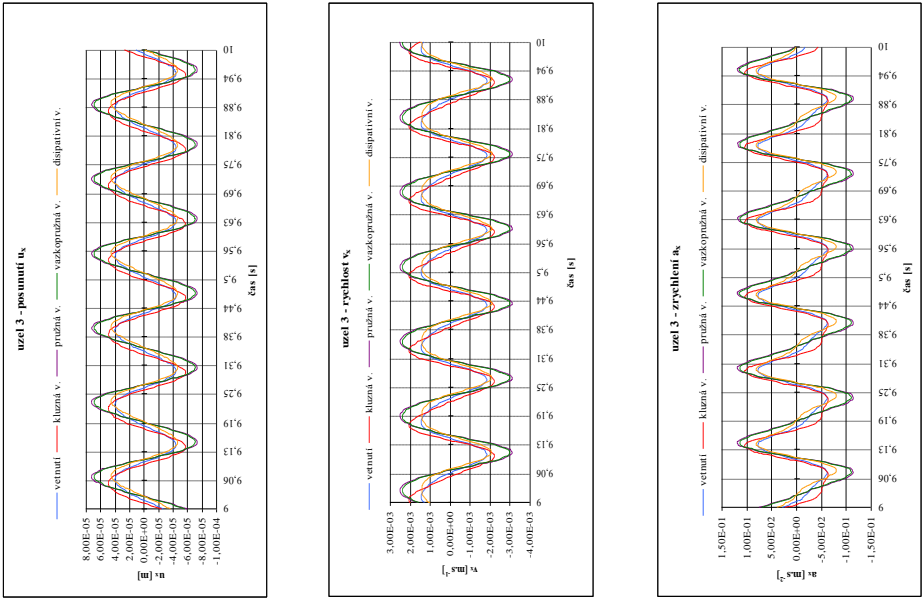
Hodnoty odezvy pro sledovaný uzel č.4 – základ. deska motoru, ukazuje tabulka 4.

Tab. 4 Maxima odezvy – uzel č.4

Uzel 4	Typ okrajové vazby				
	Vetknutí	Kluzná	Pružná	Vazkopružná	Disipativní
u_{sum} [m]	$4,58 \cdot 10^{-5}$	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$7,52 \cdot 10^{-5}$	$7,23 \cdot 10^{-5}$	$4,93 \cdot 10^{-5}$
v_{sum} [m.s ⁻¹]	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$2,52 \cdot 10^{-3}$	$3,07 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$

Při zvolení pružného nebo vazkopružného uložení jsou červeně zvýrazněné hodnoty odezvy vyšší, než připouští mezní hodnoty. Konstrukce by v tomto případě byla posouzena jako nevyhovující a hodnoty odezvy by musely být sníženy úpravou konstrukce, nebo např. vložním dalších tlumičů.

Následující grafy 7.12 až 7.14 zobrazují odezvu v uzlu č.3 ve směru osy x:



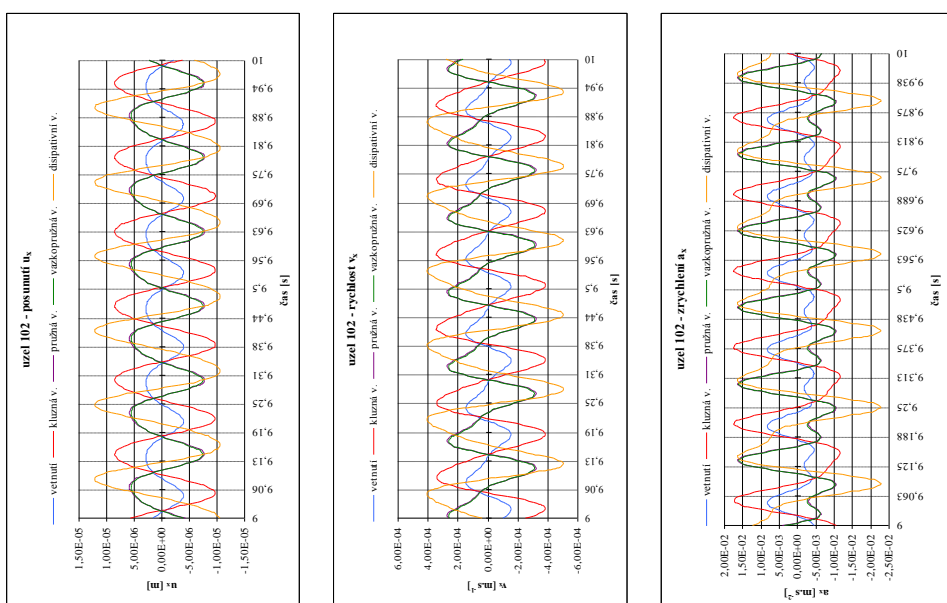
Graf 4 Odezva na buzení v čase

Je evidentní, že časová odezva konstrukce se pro jednotlivé typy okrajových podmínek velice liší. Důvod je následující:

Dynamické zatížení stroje rozkmitává konstrukci základu a toto kmitání se přenáší do modelu podzákladí. Vlnění se následně šíří podzákladím od zdroje buzení

všemi směry a během šíření je postupně tlumeno. Když vlnění dorazí na hranici oblasti podzákladí, je buď zcela nebo částečně odraženo zpět do modelu podzákladí. Množství odražené či pohlcené energie závisí na typu uložení bloku podzákladí. Odražené vlnění se šíří podzákladím zpět a dochází tak ke skládání původního a odraženého vlnění. V závislosti na fázovém posunu vůči původnímu vlnění může docházet k výraznému zesilování a nebo i zeslabování celkové amplitudy vlnění v daném místě. V různých bodech modelu tak mohou být hodnoty odezvy pro různé typy okrajové podmínky velice odlišné.

Rozdílnost v odezvě jednotlivých řešených variant v uzlech podzákladí je tedy důsledkem odražení či pohlcení pružného vlnění okrajovou podmínkou na hranici oblasti podzákladí. Doložme tvrzení hodnotami odezvy ve sledovaném uzlu podzákladí č.102.



Graf 5 Odezva na buzení v čase

Závěr

Jak bylo doloženo výsledky výpočtů, uvedenými v předchozí kapitole, typ okrajové vazby na hranici modelu oblasti podzákladí se významným způsobem promítá do hodnot odezvových veličin konstrukce. Pro různé varianty sledovaného parametru se mění hodnota odezvy konstrukce na buzení harmonickým zatížením. Rozdíly jsou řádově v desítkách procent, a to zejména v oblastech nízkých frekvencí, které jsou typické právě pro stavební konstrukce. U hodnot dynamické odezvy konstrukce na buzení ustáleným stavem kmitání je vliv okrajových podmínek na chování výpočtového modelu natolik podstatný, že změna parametrů může vést až k hodnotám odezvy konstrukce přesahujícím mezní přípustné limity pro použité strojní zařízení. Volba nevhodných vlastností výpočtového modelu tak může zbytečně zvýšit investice do

stavebních a provozních úprav konstrukce, či zapříčiní špatný návrh konstrukce a nutnost následných oprav a rekonstrukcí.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finančního přispění Výzkumného záměru MSM 0021630519 Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce.

Literatura

- [1] Kazakov, K. (2007): Continuity between Finite and Infinite Elements, Along Artificial Boundary in Soil-Structure Interaction Problems, Proceedings of the Jubilee Conference in UACG 2007, Sofia, Bulgaria
- [2] Šimonovič, M. (2006): Riešenie interakcie konštrukcia-podložie nekonečnými prvkami, dizertačná práca, STU v Bratislave

